

Modell einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung

Axel Tuma und Stephan Franke¹

Zusammenfassung

Eine Interpretation der Produktionssteuerung als regelungstechnisches System erfordert neben einer Spezifikation von Modellgrößen wie Führungs-, Stell- und Regelgrößen eine Präzisierung des Reglers. Bei einer Interpretation aus dem Blickwinkel einer entscheidungsorientierten Betriebswirtschaftslehre können die Stellgrößen eines solchen kybernetischen Systems (z.B. zeitliche Allokation von Produktionsaufträgen zu Arbeitssystemen, Fahrweise einzelner Arbeitssysteme) als Entscheidungsvariablen aufgefaßt werden. Die Rückführungsgrößen beschreiben die aktuelle Entscheidungssituation, das von der Planungsebene vorgegebene Produktionsprogramm stellt die Führungsgröße und die Regler die Instanzen zur Lösung des Entscheidungsproblems dar. Im Sinne einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung wird das dem kybernetischen Modell zugrundeliegende Entscheidungsmodell analysiert und entsprechend erweitert.

1 Präzisierung einer Produktionssteuerung auf Basis eines regelungstechnischen Ansatzes

Die Diskussion einer Definition bzw. inhaltlich-funktionalen Ausgestaltung der Produktionssteuerung ist von unterschiedlichen Auffassungen über den zugrundeliegenden Erkenntnisgegenstand geprägt. Dies ist einerseits darin begründet, daß die Produktionssteuerung sowohl Gegenstand betriebswirtschaftlicher als auch ingenieurwissenschaftlicher Teildisziplinen ist. Andererseits ist im Rahmen des operativen Produktionsmanagements die Abgrenzung zwischen Produktionsplanung und -steuerung nicht eindeutig definiert.

Neben dieser inhaltlichen Diskussion ist bereits die Bezeichnung „Produktionssteuerung,“ kritisch zu hinterfragen. Grundsätzlich stellt das Prinzip der Steuerung neben dem der Regelung das zentrale Gestaltungskonzept zur Lenkung dynamischer

¹ Universität Bremen, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Postfach 330440, 28334 Bremen, email: sfranke@uni-bremen.de

Systeme dar. Interpretiert man Produktionssysteme als dynamische Systeme, empfiehlt es sich, den Lenkungsprozeß der Produktionssteuerung aus Sichtweise der Kybernetik² zu analysieren und den Produktionsprozeß als kybernetisches Modell zu beschreiben. Kybernetische Modelle können nach Lehmann durch drei Komponenten charakterisiert werden (Lehmann 1975):

- das System als strukturelles Gebilde und Prozeßträger,
- Steuerung und Regelung als spezifische Form des Systemverhaltens zur Erreichung des Systemgleichgewichts (Stabilität),
- Informationen als funktioneller Bestandteil der Steuerung und Regelung.

Hierbei werden Steuerung und Regelung als die wesentlichen Instrumente zur Lenkung dynamischer Systeme verstanden.

Im Rahmen einer Steuerung werden auf der Basis extern vorgegebener Führungsgrößen (Zielvorgaben) Stellgrößen (etwa konkrete Aktionen) für den zu lenkenden Teil des Objektsystems (Steuerstrecke) abgeleitet, ohne die Ergebnisse des Lenkungsprozesses zu berücksichtigen. Soll durch eine Steuerung ein stabiles Systemverhalten gewährleistet werden, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein (Zäpfel 1989):

- die Auswirkungen aller möglichen Störungen auf das System müssen im Zeitablauf bekannt und erfassbar sein,
- jeder möglichen Störgröße muß eine in ihrer Wirkung vollständig bekannte Steuerungsmaßnahme ex ante zugeordnet werden können,
- das System darf keine internen Unbestimmtheiten, wie etwa fehlerhafte Nachrichtenübermittlung aufweisen.

Im Gegensatz zur Steuerung berücksichtigt die Regeleinrichtung (Regler) die Ergebnisse des Lenkungsprozesses. D. h. die Ableitung der Stellgrößen basiert neben den externen Führungsgrößen auch auf den Regelgrößen selbst (Rückkopplung). Somit nimmt die Regelung im Gegensatz zur Steuerung per se **Kontrollfunktionen** (Überwachungsfunktionen) wahr. Die Grundprinzipien der Steuerung und Regelung sind in Abbildung 1 skizziert.

² Die Kybernetik befaßt sich allgemein mit der Gestaltung stabiler dynamischer Systeme. Besondere Bedeutung kommt dabei den Lenkungsprinzipien Steuerung und Regelung zu.

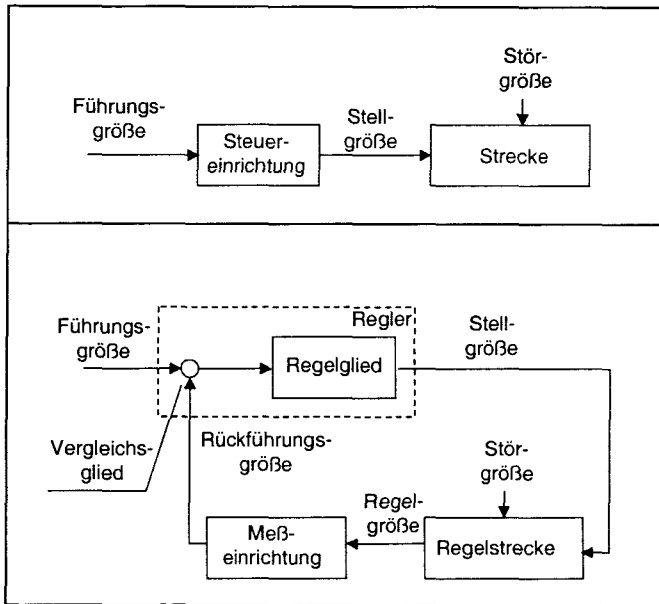


Abbildung 1
Grundprinzipien von Steuerung und Regelung

Da in realen Produktionssystemen die Auswirkungen potentieller Störungen auf das Systemverhalten nicht bekannt sind, erforderliche Steuerungsmaßnahmen nicht eindeutig ex ante jeder möglichen Störgröße zugeordnet werden können und interne Unbestimmtheiten nicht ausgeschlossen werden können, ist es erforderlich, den Prozeß der Durchsetzung übergeordneter Produktionspläne (Produktionsdurchführung) einschließlich der sich ergebenden Kontrollfunktionen als Regelkreis zu beschreiben (Abbildung 2).

Entsprechend wäre der Prozeß der Produktionsdurchführung als „Regelung“ oder Lenkung zu bezeichnen. In der Literatur wird jedoch in diesem Zusammenhang anstelle des eigentlich korrekten Begriffs der „Regelung“ oder „Lenkung“ dennoch überlicherweise von „Steuerung“ gesprochen. So umfaßt nach VDI die Steuerung der Produktion das **Veranlassen, Überwachen und Sichern** der Aufgabendurchführung hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen (VDI 1983). Gemäß dieser Sprachkonvention wird im folgenden der Begriff der „Produktionssteuerung“, verwandt, obwohl der lenkende Prozeß der Produktionsdurchführung als Regelkreis aufgefaßt wird.

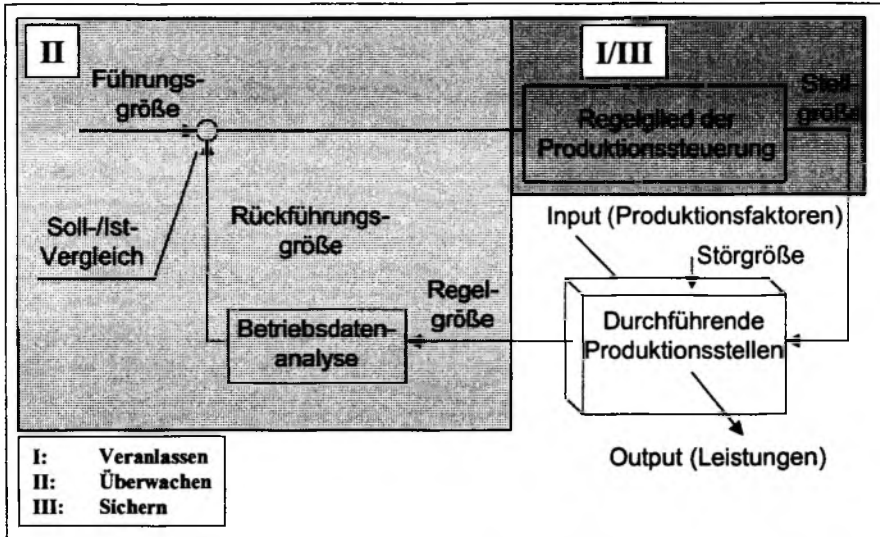


Abbildung 2

Darstellung des Prozesses der Produktionsdurchführung als kybernetisches Modell

Interpretiert man die Produktionssteuerung als Regelung sind folgende Problemstellungen zu untersuchen:

- welche Aufgaben (Funktionen) sind auf Steuerungsebene wahrzunehmen,
- welche Ausprägungen nehmen Führungs-, Stell- und Regelgrößen bzw. Rückführungsgrößen auf Steuerungsebene an,
- welche potentiellen Störungstypen sind zu berücksichtigen.

Zentrale Aufgabe der Produktionssteuerung ist die zeitliche Zuordnung einzelner Aufträge bzw. Teilaufträge zu Arbeitssystemen (Hahn 1989, Schweitzer 1990, Scheer 1995, Kern 1992). Dieser Vorgang wird auch als **Maschinenbelegung** oder **Auftragseinlastung** bezeichnet.

In neueren Produktionssteuerungskonzepten kommt der Funktion der Produktions- bzw. Fertigungssicherung eine zunehmende Bedeutung zu. Unter Fertigungssicherung versteht man sämtliche Maßnahmen zur Abwehr bzw. Beseitigung von Störungen im Fertigungsprozeß (Schweitzer 1990). Prinzipiell kann in vorsorgende und nachsorgende Sicherungsmaßnahmen unterschieden werden. Beispiele für vorsorgende Maßnahmen sind etwa das Bereithalten von Reservemaschinen, -personal und -material, vorsorgende Instandhaltungsmaßnahmen sowie die Berücksichtigung

von Zeitreserven. Beispiele für nachsorgende Sicherungsmaßnahmen sind etwa die kurzfristige Abänderung von Arbeitsplänen bzw. Maschinenbelegungsplänen.

Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang ist das Konzept des „Entstörmanagements“, bzw. des „Entstörleitstands“, nach Wildemann (Wildemann 1997). Ziel hierbei ist, die Umplanungshäufigkeit zu reduzieren, wobei das Entstörmanagement als Filter gegen die Produktionsplanung wirkt. Im Sinne einer nachsorgenden Produktionssicherung umfaßt dies insbesondere auch **zeitliche, quantitative und intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen** zur Sicherung der Einhaltung der Vorgaben übergeordneter Ebenen.

Die genannten Anpassungsmaßnahmen beziehen sich auf die Disposition des Kapazitätsangebotes, wobei intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen kurzfristig, zeitliche und quantitative Anpassungsmaßnahmen längerfristig orientiert sind. Neben solchen Maßnahmen zur Anpassung des Kapazitätsangebots sind im Rahmen einer Kapazitätsdisposition auf Produktionssteuerungsebene ebenso Funktionen zur Anpassung der Kapazitätsnachfrage erforderlich. Im kurzfristigen Bereich wird dies durch die Funktion der Auftragseinlastung gewährleistet. Bezüglich der längerfristig orientierten Anpassung der Kapazitätsnachfrage empfiehlt es sich, die Funktion der **Auftragsfreigabe** in das Produktionssteuerungskonzept zu integrieren. Hierunter versteht man eine längerfristige, kapazitätsorientierte Zuordnung von Auftragsvolumina zu Arbeitssystemen.

Entsprechend dem unterschiedlichen zeitlichen Auflösungsgrad empfiehlt es sich, die längerfristig orientierten Aufgaben auf Produktionssteuerungsebene (Auftragsfreigabe, zeitliche und quantitative Anpassungsmaßnahmen) etwa im Rahmen einer kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung, die kurzfristig orientierten Aufgaben (Auftragseinlastung, intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen) etwa im Rahmen einer Feinsteuerung zusammenzufassen. Die Aufgabe der Fertigungsüberwachung ergibt sich aus einer rollierenden, sich an der jeweils veränderten Produktionssituation orientierenden, iterativen Ausführung der dargestellten Aufgaben. Dies entspricht der Grundidee des skizzierten regelungstechnischen Ansatzes, wobei die einzelnen Teilmodelle (kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung, Feinsteuerung) als Elemente eines vermaschten Regelkreises interpretiert werden können (Zäpfel 1989).

Abbildung 3 zeigt eine Darstellung der Produktionssteuerung als regelungstechnischen Ansatz. Faßt man die Aufgaben der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung und der Feinsteuerung in einem Regler zusammen (Produktionssteuerung i.e.S.) und führt explizit die Ebene der Betriebsdatenerfassung und -analyse ein, kann dieses System als Entscheidungsmodell der Produktionssteuerung interpretiert werden. Hierbei stellen die Entscheidungsvariablen die Stellgrößen dar, die Informationen aus Betriebsdatenerfassung und -analyse können als die Entscheidungssituation beschreibende Sätze interpretiert werden, das Produktionsprogramm stellt die Führungsgröße und die Regler die Instanzen zur Lösung des Entscheidungsproblems dar.

orientieren (Wildemann 1997, Wiendahl 1997). In Anlehnung an Zäpfel (Zäpfel 1993) umfaßt dies insbesondere die Gewährleistung einer

- kurzen Lieferzeit (Zeitraum von Auftragsannahme bis Auslieferung),
- hohen Lieferbereitschaft (Quote der zu den vom Kunden gewünschten Termin-, Quantitäts- und Qualitätsanforderungen angenommenen Aufträgen),
- hohen Liefertreue (Anteil der gemäß den Kundenspezifikationen hinsichtlich Menge und Qualität rechtzeitig ausgelieferten Aufträgen) sowie,
- einer hohen Lieferflexibilität (Fähigkeit, kurzfristig auf Kundenwünsche zu reagieren).

Auf Ebene der Produktionssteuerung impliziert dies die Gewährleistung einer hohen Flexibilität, einer den Kundenanforderungen entsprechenden Qualität, einer hohen Termintreue sowie kurzer Durchlaufzeiten. Weitere Zielsetzungen betreffen die Reduktion von Beständen sowie die Erhöhung der Kapazitätsauslastung. Im Zuge einer kundenorientierten Produktion wird jedoch das Ziel der Kapazitätsauslastung zunehmend den oben genannten Zielen untergeordnet.

Zielfunktionen ergeben sich durch eine geeignete Operationalisierung der genannten Zielsetzungen. So kann beispielsweise die Zielsetzung der Termintreue mittels der quadratischen Abweichung zwischen gewünschtem und realisiertem Fertigstellungstermin ausgedrückt werden. Die sich durch eine Verknüpfung der Zielfunktion mit einem Entscheidungskriterium ergebende Handlungsvorschrift wird als Zielvorstellung bezeichnet. Hierbei kann prinzipiell in die Entscheidungskriterien

- Extremierung (Maximierung bzw. Minimierung),
- Satisfizierung und
- Fixierung

unterschieden werden (Kosiol 1968). In der betrieblichen Praxis sind insbesondere extremierende und satisfizierende Entscheidungskriterien von Bedeutung. Beispiele für extremierende Zielvorstellungen sind etwa die Minimierung der Summe der quadratischen Abweichungen zwischen gewünschten und realisierten Fertigstellungsterminen bzw. die Minimierung des Ressourceneinsatzes. Beispiel für eine satisfizierende Zielvorstellung ist etwa die Verringerung der Ausschußquote um einen festen Prozentsatz im Vergleich zur vorhergehenden Periode, wobei eine zufriedenstellende Variation als optimal akzeptiert wird. Die Menge der Zielvorstellungen bilden das Zielsystem auf Produktionssteuerungsebene.

Bestimmung der Entscheidungsvariablen und des Entscheidungsraums

Nach Diskussion der Zielvorstellungen sind im Rahmen einer Interpretation der Produktionssteuerung als Entscheidungsmodell Entscheidungsvariablen und Ent-

scheidungsraum zu spezifizieren. In diesem Zusammenhang sind nochmals die Aufgaben der Entscheidungsträger auf Produktionssteuerungsebene zu analysieren. Zentrale Aufgabe ist hierbei, wie skizziert, die zeitliche Zuordnung einzelner Aufträge bzw. Teilaufträge zu Arbeitssystemen. Dies impliziert eine Entscheidung bezüglich

- der Selektion der innerhalb der Planperiode zu fertigenden Aufträge sowie
- der prinzipiell in der Planperiode einzusetzenden Arbeitssysteme bzw. Aggregate,
- der Festlegung der Betriebszeiten der Arbeitssysteme innerhalb der Planperiode (z.B. Überstunden, Zusatzschichten),
- der Festlegung der Intensitäten (Fahrweisen) der Arbeitssysteme bzw. Aggregate,
- der tatsächlichen Einlastung einzelner Aufträge bzw. Teilaufträge auf den Arbeitssystemen bzw. Aggregaten.

Die Selektion der innerhalb der Planperiode zu fertigenden Aufträge kann als Auftragsfreigabe aufgefaßt werden. Die Festlegung der Intensitäten, die Bestimmung der Betriebszeiten sowie die Entscheidung über den prinzipiellen Einsatz bzw. die Aktivierung von Arbeitssystemen stellen klassische Anpassungsmaßnahmen (d-, t-, q-Anpassung) dar. Die genannten Maßnahmen beziehen sich auf die Disposition des Kapazitätsangebotes, wobei intensitätsmäßige Anpassungsmaßnahmen kurzfristig, zeitliche und quantitative Anpassungsmaßnahmen mittelfristig orientiert sind. Im Sinne einer rollierenden Produktionssteuerung stellen sie nach Wildemann (Wildemann 1997) das wesentliche Element der Fertigungssicherung auf Produktionssteuerungsebene dar. In diesem Zusammenhang kommt der Fertigungssicherung eine wesentliche Bedeutung hinsichtlich der Realisierung einer hohen Flexibilität in der Produktion zu. Ziel hierbei ist, die Anzahl der Umplanningvorgänge auf Ebene der Produktionsplanung zu reduzieren und statt dessen den Ausgleich unvorhergesehener Ereignisse auf Produktionssteuerungsebene zu realisieren. Die Aufgaben der Fertigungssicherung im Rahmen der Produktionssteuerung bedingen Informationen bezüglich der Ist-Situation des Produktionssystems (z.B. Ist-Kapazitäten, Störungen). Die Rückmeldung dieser Informationen entspricht der Aufgabe der Produktionsüberwachung. Die tatsächliche Zuordnung einzelner Aufträge bzw. Teilaufträge zu Aggregaten bzw. Arbeitssystemen wird als Auftragseinlastung (bzw. als Auftragsveranlassung oder Arbeitsverteilung) bezeichnet. Damit handelt es sich bei der Auftragseinlastung um eine kurzfristig orientierte Disposition der Kapazitätsnachfrage, während die Auftragsfreigabe längerfristig orientiert ist. Entsprechend des Zeitbezugs der beschriebenen Aufgaben werden die Auftragsfreigabe sowie die Maßnahmen zur quantitativen und zeitlichen Anpassung des Kapazitätsangebotes zum Entscheidungsmodell der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Auftragseinlastung und die intensitätsmäßige Anpassung des Kapa-

zitätsangebots (Intensitätssteuerung) zum Entscheidungsmodell der Feinststeuerung zusammengefaßt.

Analysiert man die Teilaufgaben der Entscheidungsträger auf Produktionssteuerungsebene, lassen sich folgende Entscheidungsvariablen identifizieren:

- *Auftragsselektion*: diese Variable gibt an, ob ein spezieller Auftrag im betrachteten Planungshorizont freigegeben wird.
- *Kapazitätsnutzung*: diese Variable gibt an, mit welcher Intensität ein Arbeitssystem bzw. Aggregat bei der Bearbeitung eines Bearbeitungsschrittes eines Auftrages zu einem Zeitpunkt gefahren wird. Dies umfaßt zunächst eine Entscheidung darüber, ob das Arbeitssystem im Planungszeitraum überhaupt aktiviert wird bzw. zu welchen Betriebszeiten das Arbeitssystem betrieben wird.
- *Einlastung*: diese Variable gibt die tatsächliche zeitliche Zuordnung eines Bearbeitungsschritts eines Auftrags zu einem Arbeitssystem an.

Durch die Zuordnung konkreter Werte zu den genannten Entscheidungsvariablen ergibt sich ein entsprechendes Planungsergebnis, welches etwa gemäß Abbildung 4 dargestellt werden kann. Auf der Basis des der Produktionssteuerungsebene übergebenen Produktionsprogramms wird entschieden, welche Aufträge für den zugrundeliegenden Planungshorizont freigegeben werden (Auftragsselektion). Ferner wird eine Entscheidung getroffen über die einzusetzenden Arbeitssysteme bzw. Aggregate sowie über deren Betriebszeiten innerhalb des Planungszeitraumes (Kapazitätsnutzung). Grundlage dieser Entscheidung ist der sich aus dem Produktionsprogramm ergebende Kapazitätsbedarf. Im Rahmen der Einlastung wird jeweils ein Auftrag bzw. Bearbeitungsschritt aus der Menge der freigegebenen Aufträge einem ausgewählten Arbeitssystem bzw. Aggregat zeitlich zugeordnet (Einlastung). Dies impliziert ebenfalls eine Entscheidung über die Intensität, mit der dieser Auftrag bzw. Bearbeitungsschritt bearbeitet wird und damit über die Dauer, für die das ausgewählte Arbeitssystem belegt ist (Kapazitätsnutzung).

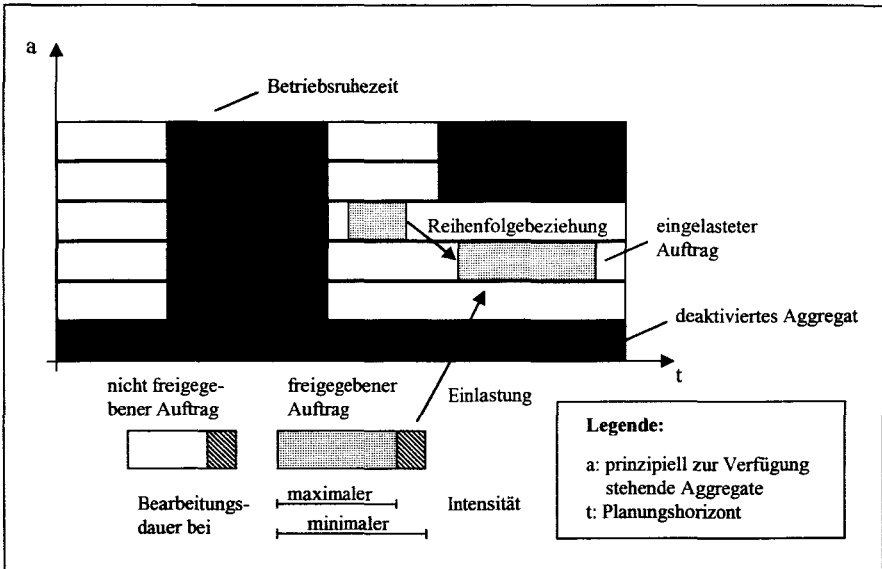


Abbildung 4
Graphische Darstellung der Produktionssteuerung als Plantafel

Bei der Zuordnung konkreter Werte zu den einzelnen Entscheidungsvariablen sind Beschränkungen bezüglich der Definitionsbereiche zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sind folgende Restriktionstypen³ zu unterscheiden:

- **Zeit-/Arbeitssystembezogene Restriktionen:** Hierbei können drei Fälle unterschieden werden:
 - Prinzipielle Deaktivierung aller Arbeitssysteme des betrachteten Produktionssystems für einen definierten Zeitraum innerhalb des Planungsintervalls (Betriebsruhezeiten).
 - Prinzipielle Deaktivierung einzelner Arbeitssysteme des betrachteten Produktionssystems für definierte Zeiten innerhalb des Planungsintervalls.
 - Einschränkungen der Fahrweise (Intensitäten) einzelner Arbeitssysteme des betrachteten Produktionssystems für definierte Zeiten innerhalb des Planungsintervalls.
- **Technologiebezogene Restriktionen:** Restriktionen dieses Typs geben für jeden Bearbeitungsschritt eines Auftrags die geeigneten Arbeitssysteme mit den zulässigen Intensitätsintervallen an. Hierunter können auch Restriktionen sub-

³ Die aufgeführten Restriktionen definieren den Lösungsraum (Entscheidungsraum).

summiert werden, die eine konstante Fahrweise während der Bearbeitung eines Arbeitsgangs gewährleisten.

- *Auftrags-/Arbeitsschrittbezogene Restriktionen:* Hierunter fallen Restriktionen, die gewährleisten, daß der gesamte Arbeitsinhalt eines Auftrages abgearbeitet wird, daß die Arbeitsgänge eines Auftrages während ihrer Bearbeitung nicht unterbrochen werden und die vorgegebenen Arbeitsgangreihenfolgen eingehalten werden.
- *Kapazitätsbezogene Restriktionen:* Dieser Restriktionstyp kann sich sowohl auf Arbeitssysteme als auch auf Ressourcen⁴ beziehen. Eine arbeitssystembezogene Restriktion ist etwa die maximale Anzahl gleichzeitig zu bearbeitender Aufträge bzw. Arbeitsgänge auf einem Arbeitssystem. Ressourcenbezogene Restriktionen beziehen sich auf die maximal zur Verfügung stehenden Mengen benötigter Einsatzstoffe.

Spezifikation der Rahmenparameter

Neben der Festlegung der Zielvorstellungen, der Bestimmung von Entscheidungsvariablen bzw. des Entscheidungsraums ist bei der Ableitung des Entscheidungsmodells einer Produktionssteuerung eine Spezifikation der Rahmenparameter erforderlich. Beispiele hierfür sind:

- Fertigstellungstermine,
- Bearbeitungszeiten,
- Arbeitsinhalte,
- Kapazitäten von Arbeitssystemen,
- verfügbare Ressourcenmengen sowie
- Verbrauchsfunktionen.

⁴ Hierbei werden unter dem Begriff Ressource Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe verstanden

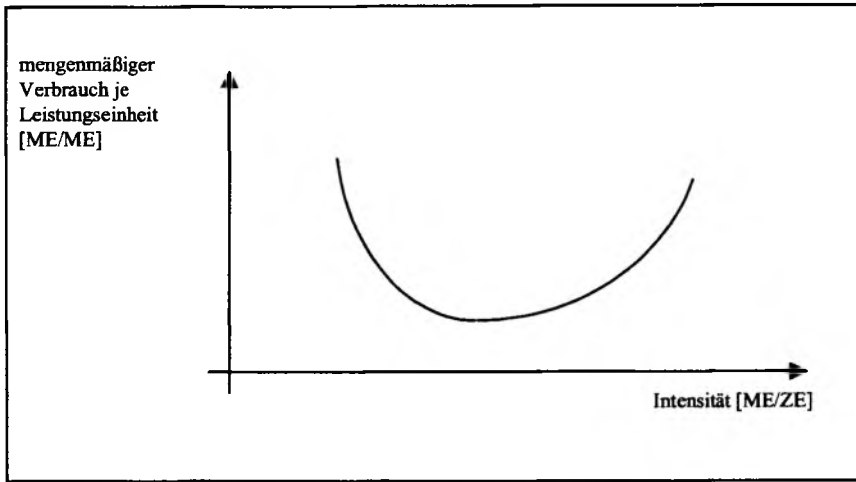


Abbildung 5
Verbrauchsfunktion

Von besonderem Interesse im Sinne einer umweltschutzorientierten Erweiterung der Produktionssteuerung sind hierbei Verbrauchsfunktionen. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen der Fahrweise eines Arbeitssystems und dem daraus resultierenden mengenmäßigen Verbrauch einer Ressource (z.B. elektrische Energie) je Leistungseinheit. Damit ermöglichen sie die direkte Beeinflussung des Ressourcenverbrauchs durch den Entscheidungsträger.

Um das beschriebene Entscheidungsmodell der Produktionssteuerung weiter zu präzisieren und insbesondere zu operationalisieren erscheint es zweckmäßig, die Zielvorstellungen, Entscheidungsvariablen, Restriktionen und Rahmenparameter als formales Modell darzustellen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die genannten Entscheidungen vor dem Hintergrund einer unterschiedlichen zeitlichen Auflösung zu treffen sind. So sind die im Rahmen der Auftragsselektion zu treffenden Entscheidungen bezüglich der freizugebenden Aufträge sowie die im Rahmen der Kapazitätsnutzung zu treffenden Entscheidungen bezüglich der Aktivierung einzelner Arbeitssysteme und deren Betriebszeiten auf einem größeren Zeitraster zu treffen als Einlastungsentscheidungen und die Bestimmung der tatsächlichen Fahrweise einzelner Arbeitssysteme bzw. Aggregate. Die unterschiedlichen Zeitraster korrespondieren hierbei mit entsprechend unterschiedlichen Planungshorizonten. Basierend auf dieser Betrachtungsweise läßt sich das Entscheidungsmodell der Produktionssteuerung als zweistufiges Modell formulieren.

Exemplarisch werden im folgenden die Teilmodelle der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Feinsteuern als gemischt-ganzzahlige Optimie-

rungsprobleme dargestellt. Die Ergebnisse auf Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung (Selektion der freizugebenden Aufträge, Entscheidung über die zu aktivierenden Arbeitssysteme bzw. deren Betriebszeiten) fließen hierbei als Rahmenparameter in das Teilmodell der Ebene der Feinsteuerung ein.

Eine Instanz eines solchen Entscheidungsmodells ist in den Gleichungen 1-1 bis 1-9 (Modell einer kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung) und in 1-10 bis 1-22 (Modell einer Feinsteuerung) dargestellt.

Bezogen auf das Modell der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung werden die Zielvorstellungen der Flexibilität, Termintreue, Qualität und Ressourcenschonung direkt durch entsprechende Zielfunktionen (1-1 bis 1-4) adressiert. Die Nebenbedingungen 1-5 bis 1-9 gewährleisten, daß die zur Bearbeitung der freigegebenen Aufträge benötigten Kapazitäten und Ressourcen zur Verfügung stehen bzw. entsprechenden Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden können.

Teilmodell der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung

Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems sind:

- Y_{ep}^i Binärvariable, die angibt, ob ein Auftrag i für die Einlastungsperiode ep freigegeben wird
- $\bar{d}_{a,ep}$ durchschnittliche Intensität, mit der das Arbeitssystem a innerhalb der Einlastungsperiode ep betrieben wird
- $Z_{a,ep}$ Betriebszeit des Arbeitssystems a innerhalb der Einlastungsperiode ep

Koeffizienten und Parameter des Entscheidungsproblems sind:

- DD^i geforderter Fertigstellungstermin des Auftrages i
- AI_a^i Arbeitsinhalt des Auftrags i auf Arbeitssystem a
- $f_a^r(\bar{d}_{a,ep})$ durchschnittlicher Ressourcenverbrauch der Ressource r auf Arbeitssystem a in Abhängigkeit der für die Einlastungsperiode ep gewählten durchschnittlichen Intensität
- RES'_{ep} während der Einlastungsperiode ep von der Ressource r verfügbare Menge

Denotation der verwendeten Indexmengen:

- $i \in I = \{1, \dots, I\}$ I bezeichnet die Menge der potentiell freizugebenden Aufträge
- $a \in A = \{1, \dots, A\}$ A bezeichnet die Menge der zur Verfügung stehenden Arbeitssysteme

$ep \in EP = \{1, \dots, EP\}$ EP bezeichnet die Menge der auf Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung betrachteten Einlastungsperioden

$r \in P = \{1, \dots, R\}$ P bezeichnet die Menge der potentiell zur Verfügung stehenden Ressourcen

Zielfunktionen:

$$\text{Max} \sum_{i \in I} \sum_{ep \in EP} Y_{ep}^i \quad (1-1)$$

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \left(DD^i - \sum_{ep \in EP} (Y_{ep}^i \cdot ep) \right)^2 \quad (1-2)$$

$$\text{Min} \sum_{ep \in EP} \left(\left[\frac{1}{EP} \sum_{ep' \in EP} (\bar{d}_{a,ep'}) \right] - \bar{d}_{a,ep} \right)^2 \quad (a = 1, \dots, A) \quad (1-3)$$

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \sum_{ep \in EP} f'_a(\bar{d}_{a,ep}) \quad (r = 1, \dots, R) \quad (1-4)$$

⁵ Ist zu gewährleisten, daß alle durch die Planungsebene vorgegebenen Aufträge realisiert werden, ist die Zielfunktion (1-1) zu ersetzen durch folgende Restriktionen

$$\sum_{ep \in EP} Y_{ep}^i = 1 \quad \text{für } i = 1, \dots, I$$

Nebenbedingungen:

$$\sum_{i \in I} Y_{ep}^i \cdot AI_a^i \leq \bar{d}_{a,ep} \cdot Z_{a,ep} \quad (a = 1, \dots, A; ep = 1, \dots, EP) \quad (1-5)$$

$$\min \bar{d}_{a,ep} \leq \bar{d}_{a,ep} \leq \max \bar{d}_{a,ep} \quad (a = 1, \dots, A; ep = 1, \dots, EP) \quad (1-6)$$

$$Z_{a,ep} \leq \max Z_{a,ep} \quad (a = 1, \dots, A; ep = 1, \dots, EP) \quad (1-7)$$

$$\sum_{a \in A} f_a^r(\bar{d}_{a,ep}) \leq RES_{ep}^r \quad (ep = 1, \dots, EP; r = 1, \dots, R) \quad (1-8)$$

$$Y_{ep}^i \in \{0,1\}, \bar{d}_{a,ep} \in \mathbb{R}^+, Z_{a,ep} \in \mathbb{Z}^+ \quad (1-9)$$

Die Zielfunktionen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems sind dabei wie folgt zu interpretieren. Die Funktion:

- (1-1) maximiert die Anzahl der freigegebenen Kundenaufträge. Dies impliziert eine Minimierung der Anzahl erforderlicher Umlanungen auf Ebene der Produktionsplanung und stellt damit nach Wildemann (Wildemann 1997) eine Zielgröße zur Operationalisierung der Flexibilität dar.
- (1-2) minimiert die quadratische Abweichung zwischen gewünschten und geplanten Fertigstellungsterminen⁶ und operationalisiert damit die Zielvorstellung einer möglichst hohen Termintreue.
- (1-3) minimiert die Varianz der geplanten durchschnittlichen Intensitäten (Arbeitsbelastung) der Arbeitssysteme und stellt somit eine Operationalisierung der Zielvorstellung der Einhaltung hoher Qualitätsanforderungen als Folge einer Vermeidung von Belastungsspitzen dar.
- (1-4) minimiert den geplanten Ressourcenverbrauch einzelner Ressourcen.

⁶ hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, daß ein für den Einlastungszeitraum t freigegebener Auftrag auch in dieser Periode fertiggestellt wird

Die Nebenbedingungen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems sind dabei wie folgt zu interpretieren. Die Gleichung bzw. Ungleichung:

- (1-5) gewährleistet, daß die zur Bearbeitung der freigegebenen Aufträge erforderliche Kapazität zur Verfügung steht.
- (1-6) schränkt den Bereich der zulässigen durchschnittlichen Intensitäten für jedes Arbeitssystem in jeder Einlastungsperiode ein.
- (1-7) schränkt den Bereich zulässiger zeitlicher Anpassungsmaßnahmen ein.
- (1-8) gewährleistet, daß die benötigten Ressourcen zur Verfügung stehen.

Die Lösung des skizzierten Teilmodells führt zu einer Festlegung der freigegebenen Aufträge (γ_{op}^i), der durchschnittlichen Intensitäten der Arbeitssysteme ($\bar{d}_{a,op}$) sowie der Betriebszeiten der einzelnen Arbeitssysteme ($z_{a,op}$) für die einzelnen Einlastungsperioden ep . Die Ausprägung der Variablen γ_{op}^i legt die Menge der zu betrachtenden Aufträge auf Ebene der Feinsteuerung fest. Die Information über die durchschnittlich zu fahrenden Intensitäten der Arbeitssysteme ergibt sich implizit aus der Menge der freigegebenen Aufträge und den gewählten Betriebszeiten.

Auf Grundlage dieser Daten kann ein Modell der Feinsteuerung formuliert werden. Dabei werden die Zielvorstellungen hinsichtlich der Kundenanforderungen (Liefertermin, Qualität) sowie hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs adressiert durch entsprechende Zielfunktionen (1-10 bis 1-12). Die Nebenbedingungen des Entscheidungsmodells der Feinsteuerung lassen sich in auftrags- bzw. arbeitsschrittbezogene Restriktionen (1-13 bis 1-16), technologiebezogene Restriktionen (1-17 und 1-18), zeitbezogene Restriktionen (1-19) sowie kapazitätsbezogene Restriktionen (1-20 und 1-21) unterscheiden.

Teilmodell der Feinsteuerung

Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems sind:

$x_{a,t}^{i^*,s_{i^*}}$ Binärvariable, die angibt, ob der Bearbeitungsschritt s_{i^*} des Auftrages i^* zum Zeitpunkt t auf dem Arbeitssystem a bearbeitet wird

$d_{a,t}^{i^*,s_{i^*}}$ Intensität, mit der der Bearbeitungsschritt s_{i^*} des Auftrags i^* zum Zeitpunkt t auf dem Arbeitssystem a bearbeitet wird

Abgeleitete Variable des Optimierungsproblems ist:

$x_t^{i^*,s_{i^*}}$ Binärvariable, die angibt, ob der Bearbeitungsschritt s_{i^*} des Auftrages i^* zum Zeitpunkt t fertiggestellt wird.

Koeffizienten und Parameter des Entscheidungsproblems sind:

z_a Vorgabe der Betriebszeit des Arbeitssystems a innerhalb der betrachteten Einlastungsperiode ep^*

$A_{i^*,s_{i^*}}$ Arbeitsinhalt des Bearbeitungsschrittes s_{i^*} des Auftrags i^*

$f_a^r(d_{a,t}^{i^*,s_{i^*}})$ Ressourcenverbrauch der Ressource r auf Arbeitssystem a in Abhängigkeit der zur Bearbeitung des Bearbeitungsschrittes s_{i^*} des Auftrags i^* zum Zeitpunkt t auf dem Arbeitssystem a eingestellten Intensität

RES_t^r zum Zeitpunkt t von der Ressource r verfügbare Menge

Denotation der verwendeten Indexmengen:

$i^* \in I^* \subseteq I$ I^* bezeichnet die Menge der von der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung für die aktuelle Einlastungsperiode freigegebenen Aufträge

$s_{i^*} \in \Sigma_{i^*} = \{1, \dots, S_{i^*}\}$	Σ_{i^*} bezeichnet die Menge der Arbeitsschritte des Auftrages i^*
$a \in A = \{1, \dots, A\}$	A bezeichnet die Menge der zur Verfügung stehenden Arbeitssysteme
$t \in T = \{1, \dots, \max_a \{z_a\}\}$	T bezeichnet die Menge der möglichen Betriebszeitpunkte
$r \in P = \{1, \dots, R\}$	P bezeichnet die Menge der potentiell zur Verfügung stehenden Ressourcen

Zielfunktionen:

$$\text{Max} \sum_{i^* \in I^*} \sum_{t \in T} X_t^{i^*, S_{i^*}} \quad (1-10)$$

$$\text{Min} \sum_{t \in T} \left(\left[\frac{1}{z_a} \sum_{t'=1}^{z_a} \left(\sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} d_{a,t'}^{i^*, s_{i^*}} \right) \right] - \sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \right)^2 \quad (a = 1, \dots, A) \quad (1-11)$$

$$\text{Min} \sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} f_a^r(d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}}) \quad (r = 1, \dots, R) \quad (1-12)$$

⁷ Ist zu gewährleisten, daß alle freigegebenen Aufträge realisiert werden, ist die Zielfunktion (1-10) zu ersetzen durch folgende Restriktionen: $\sum_{t \in T} X_t^{i^*, S_{i^*}} = 1$ für $i = 1, \dots, I$

Nebenbedingungen:

$$\sum_{t \in T} X_t^{i^*, s_{i^*}} * A I^{i^*, s_{i^*}} = \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} * d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 1, \dots, S_{i^*}) \quad (1-13)$$

$$\sum_{t \in T} X_t^{i^*, s_{i^*}} \leq 1 \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 1, \dots, S_{i^*}) \quad (1-14)$$

$$(x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} - x_{a,t+1}^{i^*, s_{i^*}}) \leq X_t^{i^*, s_{i^*}} \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 1, \dots, S_{i^*}; a = 1, \dots, A; t = 1, \dots, z_a) \quad (1-15)$$

$$x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} * A I^{i^*, s_{i^*}-1} \leq \sum_{a' \in A} \sum_{t'=1}^{t-1} x_{a',t'}^{i^*, s_{i^*}-1} * d_{a',t'}^{i^*, s_{i^*}-1} \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 2, \dots, S_{i^*}; a = 1, \dots, A; t = 2, \dots, z_a) \quad (1-16)$$

$$x_{a,t+1}^{i^*, s_{i^*}} * d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} - x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} * d_{a,t+1}^{i^*, s_{i^*}} = 0 \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 1, \dots, S_{i^*}; a = 1, \dots, A; t = 1, \dots, z_a - 1) \quad (1-17)$$

$$\min d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \leq d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \leq \max d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \quad (i^* \in I^*; s_{i^*} = 1, \dots, S_{i^*}; a = 1, \dots, A; t = 1, \dots, z_a) \quad (1-18)$$

$$\sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} \sum_{t=z_a+1}^{\max\{z_a\}} d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} = 0 \quad (a = 1, \dots, A) \quad (1-19)$$

$$\sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} \sum_{a \in A} f_a^r(d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}}) \leq RES_t^r \quad (t = 1, \dots, \max\{z_a\}; r = 1, \dots, R) \quad (1-20)$$

$$\sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_{i^*} \in \Sigma_{i^*}} x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \leq 1 \quad (a = 1, \dots, A; t = 1, \dots, z_a) \quad (1-21)$$

$$x_{a,t}^{i^*, s_{i^*}}, X_t^{i^*, s_{i^*}} \in \{0,1\}, d_{a,t}^{i^*, s_{i^*}} \in \mathfrak{R}^+ \quad (1-22)$$

Die Zielfunktionen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems sind dabei wie folgt zu interpretieren. Die Funktion:

- (1-10) maximiert die Anzahl der fertiggestellten, von der Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung freigegebenen, Kundenaufträge.
- (1-11) minimiert die Varianz der tatsächlich gefahrenen Intensitäten auf den einzelnen Arbeitssystemen. Hierdurch wird eine Vermeidung von Belastungsspitzen für die einzelnen Arbeitssysteme angestrebt, wodurch eine Voraussetzung für die Gewährleistung einer hohen Produktqualität geschaffen wird.
- (1-12) minimiert den Ressourcenverbrauch einzelner Ressourcen.

Die Nebenbedingungen des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems sind dabei wie folgt zu interpretieren. Die Gleichung bzw. Ungleichung:

- (1-13) stellt sicher, daß für jeden eingelasteten Auftrag alle Bearbeitungsschritte vollständig bearbeitet werden.
- (1-14) - (3-15) stellen die Nichtunterbrechbarkeit der Bearbeitungsschritte sicher und gewährleisten, daß ein Bearbeitungsschritt eines Auftrages auf ein und demselben Arbeitssystem durchgeführt wird.
- (1-16) gewährleistet die Einhaltung der Reihenfolgebeziehungen zwischen den Bearbeitungsschritten eines Auftrages.
- (1-17) stellt sicher, daß während der Durchführung eines Bearbeitungsschrittes die gewählte Intensität beibehalten wird.
- (1-18) schränkt den Bereich der zulässigen Intensitäten in Abhängigkeit des Zeitpunktes, des Arbeitssystems und des Bearbeitungsschrittes eines Auftrages ein.
- (1-19) gewährleistet, daß die von der Ebene der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung vorgegebenen Betriebszeiten berücksichtigt werden.
- (1-20) gewährleistet, daß die Kapazitätsrestriktionen hinsichtlich der benötigten Ressourcen eingehalten werden
- (1-21) gewährleistet, daß zu keinem Zeitpunkt auf einem Arbeitssystem mehr als ein Bearbeitungsschritt eines Auftrages durchgeführt wird.

3 Umweltschutzorientierte Erweiterung des Entscheidungsmodells einer Produktionssteuerung

Eine Analyse bisheriger Arbeiten auf dem Gebiet einer umweltschutzorientierten Produktionsplanung und -steuerung zeigt, daß die vorgeschlagenen Erweiterungen insbesondere den Bereich der Produktionsplanung betreffen (Dyckhoff 1995, Krcmar 1997, Haasis 1996, Haasis et al. 1995, Weller 1997). In (Rautenstrauch 1997) sowie (Kurbel/Rautenstrauch 1997) wird erstmals ein in sich geschlossenes Konzept für ein Produktionsplanungs- und Recycling-System entwickelt und vorgestellt. Neuere Ansätze zur Integration von Recyclingkonzepten in PPS-Systeme finden sich etwa in (Corsten/Reiss 1991, Spengler 1994, Inderfurth 1997, Steven/Lethmathe 1996). Ein geschlossener Ansatz zur Integration umweltschutzorientierter Zielsetzungen in das Entscheidungsmodell der Produktionssteuerung fehlt jedoch bislang.

Eine umweltschutzorientierte Erweiterung des Entscheidungsmodells der Produktionssteuerung umfaßt eine Bestimmung zusätzlicher **Zielvorstellungen**, eine Diskussion der **Entscheidungsvariablen** bzw. des **Entscheidungsraums** sowie eine Spezifikation entsprechender **Rahmenparameter**.

Bestimmung umweltschutzorientierter Zielvorstellungen

Prinzipielle umweltschutzorientierte Zielsetzungen sind die

- Reduzierung des Ressourceneinsatzes und die
- Reduzierung der Ausbringung aller unerwünschten Kuppelprodukte (Emissionen) des Leistungserstellungsprozesses.

Interpretiert man unerwünschte Kuppelprodukte⁸ (Emissionen) als negative Outputs, können umweltschutzorientierte Zielsetzungen auf Basis des Produktivitätskalküls abgeleitet werden (Abbildung 6). Bezogen auf die Realisierung einer kundenorientierten Produktion im Sinne einer termingerechten Fertigstellung aller Aufträge impliziert dies auf Produktionssteuerungsebene die Verwirklichung des Minimalprinzips der mengenmäßigen Fassung des Wirtschaftlichkeitsprinzips, d.h. ein gegebenes Produktionsprogramm soll unter minimalem Ressourceneinsatz bzw. Emissionsanfall realisiert werden.

⁸ hierbei wird der Fall einer Kuppelproduktion mit variabler Relation unterstellt

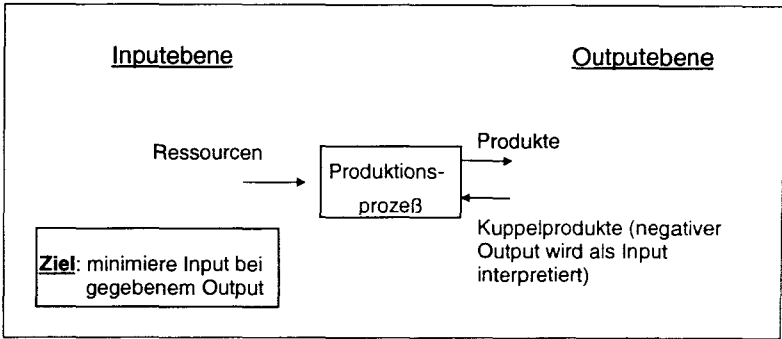


Abbildung 6
Ableitung der umweltschutzorientierten Zielsetzungen aus dem
ökonomischen Prinzip

Erweitert man das Kalkül einer Produktionssteuerung um die oben genannten umweltschutzorientierten Kriterien, ergibt sich die Notwendigkeit der Diskussion der auf diese Weise neu entstandenen Zielbeziehungen. Ausgewählte Zielbeziehungen sind etwa in Abbildung 7 dargestellt.

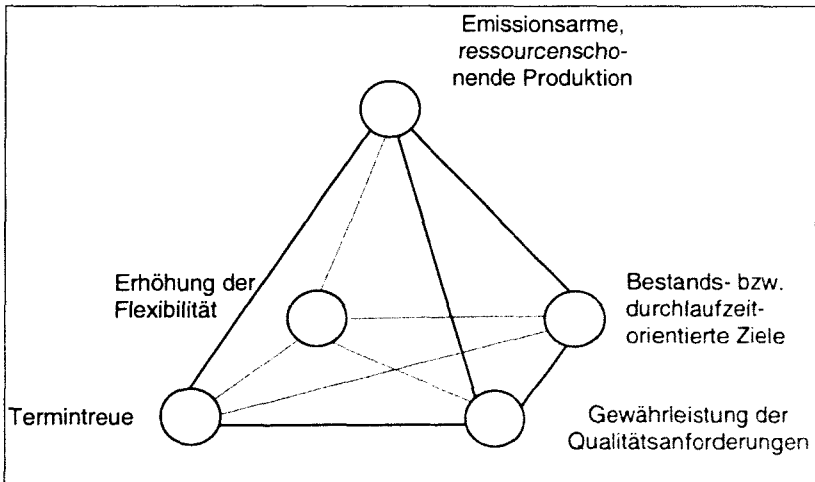


Abbildung 7
Zielsystem einer umweltschutzorientierten Produktion

Prinzipiell können die Beziehungen innerhalb der betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen, innerhalb der umweltschutzorientierten Zielsetzungen als auch zwischen diesen Zielkategorien komplementärer, indifferenter oder konfliktärer Natur sein. Kritisch bei der Entwicklung von Entscheidungsmodellen ist eine adäquate Behandlung konfliktärer Zielbeziehungen. Beispiele konfliktärer Zielbeziehungen betreffen etwa:

- Eine Erhöhung der Flexibilität, etwa durch intensitätsmäßige oder quantitative Anpassungsmaßnahmen, kann zu Belastungsspitzen führen, die sich negativ auf die Einhaltung von Qualitäts- und Umweltstandards auswirken können.
- Das Ziel der Einhaltung von Fertigstellungsterminen kann erfordern, daß ressourcen- bzw. emissionsoptimale Betriebspunkte einzelner Arbeitssysteme im Rahmen einer intensitätsmäßigen Anpassung verlassen werden müssen.

Die Integration zusätzlicher Zielvorstellungen im Sinne einer umweltschutzorientierten Erweiterung des Zielsystems einer Produktionssteuerung erhöht i. allg. die Dimension des Entscheidungsmodells und führt ceteris paribus zu Bewertungsproblemen.

Umweltschutzorientierte Diskussion von Entscheidungsvariablen und des Entscheidungsraums

Nach Diskussion des erweiterten Zielsystems sind im Rahmen einer Interpretation einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung als Entscheidungsmodell Entscheidungsvariablen und Entscheidungsraum zu spezifizieren. Eine Analyse der Aufgaben auf Produktionssteuerungsebene zeigt, daß diese unabhängig von einer speziellen Ausprägung des Zielsystems sind. Dies impliziert, daß die Entscheidungsvariablen Auftragsselektion, Kapazitätsnutzung und Einlastung auch bei einer wie oben definierten, umweltschutzorientiert erweiterten Produktionssteuerung unverändert Gültigkeit haben. So hängt der Ressourcenverbrauch und der Emissionsanfall vollständig von der Auswahl der einzusetzenden Aggregate, deren Betriebszeiten und Fahrweisen bzw. von der zeitlichen Zuordnung der einzelnen Aufträge (Arbeitsgänge) zu den Aggregaten ab. Dies bedeutet insbesondere auch, daß die Stellgrößen des Regelglieds einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung unverändert bleiben.

Untersucht man die genannten Restriktionstypen einer Produktionssteuerung, sind im Rahmen einer umweltschutzorientierten Erweiterung vor allem kapazitätsbezogene Restriktionen zu betrachten. Neben Arbeitssystemen und Ressourcen kann dieser Restriktionstyp ebenfalls auf Emissionen bezogen werden. Beispiele hierfür sind etwa einzuhaltende Grenzwerte.

Die Integration zusätzlicher umweltschutzorientierter Restriktionen schränkt i. allg. den Lösungsraum des Entscheidungsproblems weiter ein.

Spezifikation der Rahmenparameter

Bei der Spezifikation der Rahmenparameter des Entscheidungsmodells einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung kommt den Verbrauchsfunktionen im Rahmen der Realisierung einer ressourcenschonenden Produktion besondere Bedeutung zu. In Analogie zu den Verbrauchsfunktionen sind aus umweltschutzorientierter Sicht zusätzlich Emissionsfunktionen zu definieren. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen der Fahrweise eines Arbeitssystems und dem daraus resultierenden mengenmäßigen Anfall einer Emission (z.B. CO₂) je Leistungseinheit. Damit wird zusätzlich die direkte Beeinflussung der bei der Leistungserstellung anfallenden Emissionen möglich.

Modellerweiterung

Entsprechend der Diskussion einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung werden im folgenden exemplarisch die in den Gleichungen 1-1 bis 1-22 beschriebenen Modelle erweitert. Dies bedeutet neben einer Definition von Emissionsfunktionen $e_a^e(\bar{d}_{a,ep})$ ⁹ bzw. $e_a^e(d_{a,t}^{i,s,*})$ ¹⁰ für die einzelnen Emissionsarten $e \in E = \{1, \dots, E\}$ ¹¹ insbesondere eine Einführung von zusätzlichen Zielfunktionen bzw. Restriktionen.

So kann das Modell der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung bzw. der Feinsteuerung um **Zielfunktionen** zur Minimierung des Emissionsanfalls (1-23) bzw. (1-24) erweitert werden.

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \sum_{ep \in EP} e_a^e(\bar{d}_{a,ep}) \quad (e = 1, \dots, E) \quad (1-23)$$

$$\text{Min} \sum_{i^* \in I^*} \sum_{s_i^* \in \Sigma_i^*} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} e_a^e(d_{a,t}^{i^*,s_i^*}) \quad (e = 1, \dots, E) \quad (1-24)$$

Bezogen auf umweltschutzorientierte **Restriktionen** ist in emissions- und ressourcenorientierte zu unterscheiden. Aufgabe emissionsorientierter Restriktionen ist die

⁹ $e_a^e(\bar{d}_{a,ep})$ gibt den durchschnittlichen Emissionsanfall der Emissionsart e auf Arbeitssystem a in Abhängigkeit der für die Einlastungsperiode ep gewählten durchschnittlichen Intensität an

¹⁰ $e_a^e(d_{a,t}^{i^*,s_i^*})$ gibt den Emissionsanfall der Emissionsart e auf Arbeitssystem a in Abhängigkeit der zur Bearbeitung des Bearbeitungsschrittes s_i^* des Auftrags i^* zum Zeitpunkt t auf dem Arbeitssystem a eingestellten Intensität an.

¹¹ E bezeichnet die Menge der potentiell anfallenden Emissionsarten.

Gewährleistung der Einhaltung der erlaubten Ausbringungsmengen¹² einzelner Emissionsarten. Bei der Erweiterung beider Teilmodelle um emissionsorientierte Restriktionen kann prinzipiell in zwei Fälle unterschieden werden. Die Gleichungen (1-25) und (1-26) gehen von einer integrierten Betrachtung der Emissionsanfallmenge über alle Aggregate (Bubble-Konzept) aus, während die Gleichungen (1-27) und (1-28) von einer arbeitssystembezogenen Sichtweise ausgehen (vgl. TA-Luft). Hierbei beziehen sich die Gleichungen (1-25) und (1-27) auf das Teilmodell der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung, die Gleichungen (1-26) und (1-28) beziehen sich auf das Teilmodell der Feinsteuerung.

$$\sum_{a \in A} e_a^e(\bar{d}_{a,ep}) \leq EM_{ep}^e \quad (ep = 1, \dots, EP; e = 1, \dots, E) \quad (1-25)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s_i \in \Sigma_i} \sum_{a \in A} e_a^e(d_{a,t}^{i,s_i}) \leq EM_t^e \quad (t = 1, \dots, \max\{z_a\}; e = 1, \dots, E) \quad (1-26)$$

$$e_a^e(\bar{d}_{a,ep}) \leq EM_{a,ep}^e \quad (a = 1, \dots, A; ep = 1, \dots, EP; e = 1, \dots, E) \quad (1-27)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s_i \in \Sigma_i} e_a^e(d_{a,t}^{i,s_i}) \leq EM_{a,t}^e \quad (a = 1, \dots, A; t = 1, \dots, z_a; e = 1, \dots, E) \quad (1-28)$$

Bezogen auf die ressourcenorientierten Nebenbedingungen der zuvor dargestellten Teilmodelle der kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Feinsteuerung liegt nur dann eine Modellerweiterung vor, wenn aus umweltschutzorientierter Sicht der Verbrauch zusätzlicher Ressourcenarten beschränkt wird. Dies führt i. allg. zu einer weiteren Beschränkung des Lösungsraums und stellt damit einen potentiellen Konflikt zu anderen Zielvorstellungen dar. Ist eine aus umweltschutzorientierter Sichtweise erforderliche Ressourcenbeschränkung aus betriebswirtschaftlichen Gründen bereits im Modell enthalten, liegt eine komplementäre Zielbeziehung zwischen den entsprechenden Zielvorstellungen vor.

¹² EM_{ep}^e bezeichnet die für die Einlastungsperiode ep von der Emissionsart e erlaubte Ausbringungsmenge, $EM_{a,ep}^e$ bezeichnet die für die Einlastungsperiode ep von der Emissionsart e auf Arbeitssystem a erlaubte Ausbringungsmenge, EM_t^e bezeichnet die zum Zeitpunkt t von der Emissionsart e erlaubte Ausbringungsmenge, $EM_{a,t}^e$ bezeichnet die zum Zeitpunkt t von der Emissionsart e auf Arbeitssystem a erlaubte Ausbringungsmenge.

Literaturverzeichnis

- Corsten, H./Reiss, M. (1991): Recycling in PPS-Systemen, in: Die Betriebswirtschaft, S. 615-627.
- Dyckhoff, H. (1995): Grundzüge der Produktionswirtschaft, Berlin u.a.
- Haasis, H.-D. (1996): Betriebliche Umweltökonomie, Bewerten - Optimieren - Entscheiden, Berlin u.a.
- Haasis, H.-D./Hilty, L.M./Kürzl, H./Rautenstrauch, C. (Hrsg.) (1995): Betriebliche Umweltinformationssysteme (BUIS), Projekte und Perspektiven, Marburg.
- Hahn, D. (1989): Prozeßwirtschaft - Grundlegung. In: Hahn, D.; Laßmann, G. (Hrsg.): Produktionswirtschaft - Controlling industrieller Produktion, Bd. 2, Heidelberg.
- Inderfurth, K. (1997): Neuere Ansätze zur Produktionsplanung und -steuerung unter Einbeziehung von Recycling, in: Proceedings der DGOR-Jahrestagung, Jena.
- Kern, W. (1992): Industrielle Produktionswirtschaft, Stuttgart.
- Kosiol, E. (1968): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden.
- Krcmar, H. u.a. (1997): ECO-Integral, in: UmweltWirtschaftsForum, Nr. 3, S. 28-31.
- Kurbel, K./Rautenstrauch, C. (1997): Integration des Produktrecycling in die Produktionsplanung und -steuerung, in: Weber, J. (Hrsg.): Umweltmanagement, Stuttgart, S. 299-320.
- Lehmann, H. (1975): Kybernetik, in: Grochla, E., Wittmann, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Stuttgart.
- Rautenstrauch, C. (1997): Fachkonzept für ein integriertes Produktions-, Recyclingplanungs- und -steuerungssystem (PRPS-System), Berlin u.a.
- Scheer, A.-W. (1995): Wirtschaftsinformatik, Berlin et al.
- Schweitzer, M. (1990): Industriebetriebslehre, München.
- Spengler, T. (1994): Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte, Berlin.
- Steven, M./Letmathe, P. (1996): Umweltstücklisten für umweltorientierte PPS-Systeme, in: Albach, H./Dyckhoff, H. (Schriftl.): Betriebliches Umweltmanagement, Wiesbaden, (Ergänzungsheft 2/96 der Zeitschrift für Betriebswirtschaft), S. 165-183.
- VDI (1983): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung, Düsseldorf.
- Weller, A. (1997): BMBF-Vorhaben OPUS, in: UmweltWirtschaftsForum, Nr. 3, S. 32-35.
- Wiendahl, H.-P. (1997): Fertigungsregelung – Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells, München.
- Wildemann, H. (1997): Logistik Prozeßmanagement, München.
- Zäpfel, G. (1989): Produktionswirtschaft – Operatives Produktions-Management, Berlin et al.
- Zäpfel, G. (1993): Produktionsplanung und -steuerung in der „Fabrik der Zukunft“, in: Milling, P./Zäpfel, G. (Hrsg.): Betriebswirtschaftliche Grundlagen moderner Produktionsstrukturen, Herne u. a..